**Fachbereichsarbeit**

# Schwache Wechselwirkung – Higgs-Mechanismus

Jan Hurt

31. Oktober 2014

vorgelegt bei
Franz Schneider

# Inhaltsverzeichnis

# 1 Kräfte und Wechselwirkungen

## 1.1 Kräfte im Alltag

Laut dem zweiten Newtonschen Axiom, ist die Auswirkung einer Kraft auf einen Körper, mathematisch ausgedrückt mit

$$\vec{F} = m\vec{a} \tag{1.1}$$

gegeben. Das heißt, dass sich ein Körper, auf den keine Kraft einwirkt, gleichförmig auf einer geradlinigen Bahn bewegt.
Nun kann eine Kraft die verschiedensten Ursprünge haben. Wir möchten uns nur mit Wechselwirkungskräften beschäftigen. Wie der Name schon verrät, geht es dabei um die Wechselwirkung zwischen mindestens zwei Teilchen und/oder Stoffen. Ein Beispiel dafür ist die Adhäsionskraft. Sie wirkt beispielsweise zwischen Wasser- und Glasmolekülen und ist dafür verantwortlich, dass sich das Wasser am Rand eines Glases aufwölbt. Das heißt, die Adhäsionskraft bewirkt, dass sich Wassermoleküle entgegen der Schwerkraft entlang des Glases ein Stück weit aufwärts bewegen. Das bringt uns gleich zu unserem nächsten Beispiel, der Schwerkraft. Die Schwerkraft wirkt zwischen beliebigen Körpern. Natürlich muss die Masse von mindestens einem der Körper sehr groß sein, damit es zu deutlichen Auswirkungen kommt.
Diese Phänomene haben auf den ersten Blick sehr wenig gemeinsam. Dies liegt vor allem daran, dass die Gravitation eine Grundkraft ist, die Kohäsion dagegen nur eine Nebenerscheinung der elektromagnetischen Wechselwirkung. Doch dazu im nächsten Kapitel.

## 1.2 Die Grundkräfte

Wenn man nun den genaueren Aufbau des Wassers und des Glases betrachtet, stellt man fest, dass beide, auf Atomebene, elektrisch geladene Strukturen aufweisen. Die negativ/positiv geladenen Bereiche des Wassermoleküls werden von den positiv/negativ geladenen Bereichen des Glases angezogen. Nun hat die elektrostatische Kraft, die Kraft, die zwischen elektrisch

geladenen Körpern auftritt, schon weit mehr Eigenschaften, die sie mit der Gravitation teilt. Eine davon ist, dass ihre Stärke proportional zum Reziprokwert des Quadrates des Abstandes zwischen den beiden Körpern ist. Mathematisch ausgedrückt heißt das: $F \propto 1/r^2$
Eine weitere Gemeinsamkeit ist, dass die Kraft zwischen den beiden Körpern von einer bestimmten, quantifizierbaren Eigenschaft abhängt. Bei der elektrostatischen Kraft ist es die Ladung des Körpers, bei der Gravitation seine Masse. Nun zeigen Experimente, dass das Produkt dieser zwei Eigenschaften ausschlaggebend ist. Mathematisch: $F \propto E_1 \cdot E_2$ (wobei $E_1\ und\ E_2$ die Eigenschaft ist, die die Wirkung der Kraft hervorruft)
Wenn man nun die beiden oben angeführten Zusammenhänge: $F \propto 1/r^2$ und
$F \propto E_1 \cdot E_2$ zusammenführt, kommt man zu dieser Formel

$$\vec{F} = f\frac{E_1 E_2}{r^2}\vec{r_0}. \tag{1.2}$$

$f$ ist eine Konstante, die das Umrechnen der Einheiten ermöglicht. Es gibt auch die Stärke der jeweiligen Kraft an. Das heißt, wenn $f$ größer ist, steigt die Auswirkung der Wechselwirkung auf die beteiligten Teilchen. $\vec{r_0}$ ist der Einheitsvektor, der in die Richtung der wirkenden Kraft zeigt.
Dieses Schema führt, bei der Schwerkraft angewendet, zu folgender Formel

$$\vec{F} = G\frac{m_1 m_2}{\vec{r}^2}\vec{r_0}, \tag{1.3}$$

wobei $G \approx 6,6763 \cdot 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$ ist.
Für die elektrostatische Kraft gilt

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{\vec{r}^2}\vec{r_0}, \tag{1.4}$$

wobei $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} A^2 s^4 kg^{-1} m^3$ ist. Die Form $\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ für $f$ wird aus Gründen, die später noch genauer erläutert werden, gewählt. Grundsätzlich könnte man sich den Wert auch einmal ausrechnen und anschließend diesen immer einsetzen.

## 1.3 Der Feldbegriff

Welche Kraft wirkt nun auf einen Körper, dessen Ladung dem Wert eins entspricht? Hierzu wird nochmals das Grundschema der Kraft zwischen zwei Körpern verwendet, die durch

Wechselwirkung entsteht:

$$\vec{F} = f\frac{E_1E_2}{\vec{r}^2}\vec{r_0}. \tag{1.5}$$

Dividiert man nun $\vec{F}$ durch $E_2$ kommt man auf einen Wert, welcher der Kraft auf die Einheitsladung erzeugt von $E_1$ entspricht. Multipliziert mit der Ladung eines Körpers, erhält man die Kraft, die der Körper an diesem Ort erfahren würde.

$$\vec{Z} = \frac{\vec{F}}{E_2} = f\frac{E_1}{\vec{r}^2}\vec{r_0} \tag{1.6}$$

$$\vec{F} = \vec{Z} \cdot E_2 \tag{1.7}$$

$\vec{Z}$ nennen wir die Feldstärke der Wechselwirkung an einem bestimmten Ort. Das heißt, dass jeder Körper, der bezüglich einer Kraft eine bestimmte Ladung trägt, den ganzen Raum mit einem Feld durchzieht.

### 1.3.1 Wechselwirkungen und der Energieerhaltungssatz

Erfährt ein ruhender Körper eine Kraft, muss Energie aufgewendet werden, um ihn von seinem Ort zu bewegen. Diese Energie ist mit $E = \vec{F}\vec{s}$ gegeben. Wenn man nun $\vec{F}$ von den oben stehenden Formeln einsetzt, kann berechnet werden, welche Energie frei werden würde, wenn man das Teilchen sich selbst überlässt. Es wird über $\vec{r}$, dem vom Ursprung der Kraft zurückgelegten Weg, integriert:

$$E = \int_{s_1}^{s_2} \vec{F}d\vec{s} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q_1Q_2}{r^2}dr = \frac{Q_1Q_2}{4\pi\epsilon_0}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \tag{1.8}$$

Diese Energie wird durch die Potentialdifferenz des Feldes angegeben. Wie die Feldstärke ist das Potential eine vom Ort abhängige Funktion (das wird als $\Phi(\vec{r})$ angeschrieben)

$$\Phi(r) = \frac{E}{Q_2} = -\frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r} \tag{1.9}$$

Ein Teilchen würde sich wie eine Murmel in einer derart geformten (wie sie die Funktion $\Phi(\vec{r})$ beschreibt) Schüssel verhalten. Für ein Elektron verursacht das Proton ein elektrisches Feld, das für dieses Elektron die folgende Form hat:

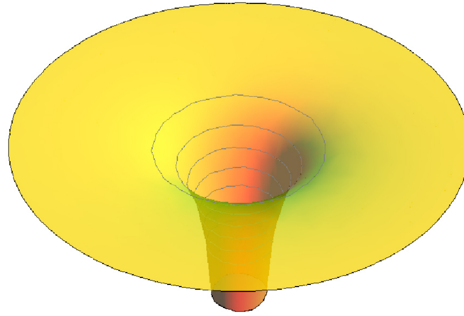


Abbildung 1.1: Der Graph der Funktion $z = 1/(x^2 + y^2)$

Wird die Murmel in die Schüssel gelegt, beginnt sich die potentielle Energie in kinetische umzuwandeln (sie beginnt zu rollen). Wenn das in einem Atom mit einem Elektron passiert, gibt es die Energie in der Form von elektromagnetischen Wellen (Licht) ab. Mathematisch wird dieser Sachverhalt mit dem Nabla-Operator ($\vec{\nabla}$) ausgedrückt. Dieser bildet die partielle Ableitung des Feldes $\Phi(x, y, z)$ nach jeder Koordinate.[1] Das heißt:

$$\vec{\nabla}\Phi(x, y, z) = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} \Phi = -\vec{Z}. \qquad (1.10)$$

## 1.4 Wirkung der Wechselwirkungen in der Quantenphysik

### 1.4.1 Die Überträgerteilchen – Das Eichboson

Natürlich werden die Wechselwirkungen nicht von Geisterhand übertragen. Sondern man führt sogenannte Eichbosonen ein, die als Überträgerteilchen fungieren. Doch woher kommen diese?
Hiezu muss als allererstes die Masse-Energie-Äquivalenz beschrieben werden.

> *"Die Grundlage für die Umwandlung von Strahlung in Materie und umgekehrt liegt in einer Gleichwertigkeit (Äquivalenz) von Masse und Energie (...)* $E = m \cdot c_0^2$.*"*[2]

Das heißt, wir benötigen einen Mechanismus, der zulässt, dass Energie ausgeborgt wird.

---

[1] Embacher, Franz: sexless, S. 48f
[2] Jaros, Albert; Nussbaumer, Alfred; Nussbaumer Peter: sexless, S. 24

Diesen Mechanismus erklärt die Heisenbergsche Unschärferelation

$$\Delta E \Delta t \approx h. \tag{1.11}$$

Aufgrund des kleinen Wertes von h ($\approx 6,63 \cdot 10^{-36} Js$) lässt sich dieser Effekt nicht im Alltag beobachten. Auf mikroskopischer Ebene jedoch erhält er durchaus eine Wichtigkeit. Denn nach dieser Formel können für eine sehr kurze Zeit Teilchen entstehen, die sich dann aber gleich wieder im nichts auflösen. Die Zeit $\Delta t$, die diese Teilchen existieren, kann leicht durch eine Umformung der oben stehenden Gleichung zu

$$\Delta t \approx \frac{h}{\Delta E} \tag{1.12}$$

berechnet werden. Das heißt, dass die Zeit, in der dieses virtuelle Teilchen existiert, beliebig lang sein kann, solange die Masse des Teilchens genügend klein ist. Das trifft nur auf Teilchen zu, die keine Ruhemasse besitzen und sich deshalb ständig mit Lichtgeschwindigkeit bewegen (müssen).

Der berühmteste Vertreter der Eichbosonen ist das Photon als Überträgerteilchen für die elektromagnetische Wechselwirkung. Weiters wirkt das Gluon für die starke Kernkraft und das Graviton, das zwar noch nie beobachtet wurde, aber trotzdem immer als Überträger der Schwerkraft erwähnt wird. Die schwache Kraft bildet hier einen Spezialfall, der später noch ausführlich besprochen wird.

### 1.4.2 Feynman-Graphen

Die einfachste Darstellung des Austausches von Eichbosonen ist die mittels sogenannter Feynman-Graphen. Das sind Graphen in denen entlang der x-Achse der Raum und entlang der y-Achse die Zeit aufgetragen wird. Die Einheiten werden dabei so gewählt, dass entlang der y-Achse ct aufgetragen ist. Das heißt, dass ein Photon in diesem Koordinatensystem als eine im $45°$ Grad Winkel zur x-Achse stehende Gerade beschrieben werden kann.

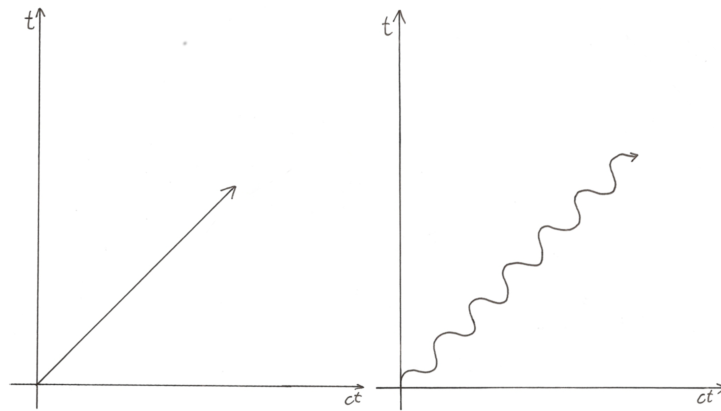



Abbildung 1.2: Ein Photon, das eine Mal als gerade Linie und das zweite Mal als Welle dargestellt.

Um die verschiedenen Teilchenarten besser voneinander unterscheiden zu können, werden Photonen in Anlehnung an ihre Welleneigenschaften meistens als Wellen dargestellt.
Nun kann man auf diese Art den Austausch von Photonen als kraftübertragendes Teilchen der elektromagnetischen Kraft darstellen. Hierzu betrachten wir nun zwei Elektronen, die sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit aufeinander zubewegen. Dann emittiert ein Elektron ein Photon, wodurch eine Impulsänderung in die entgegengesetzte Richtung erfolgt. Dieses Photon wird daraufhin vom anderen Elektron absorbiert, das ebenfalls seinen Impuls ändert.

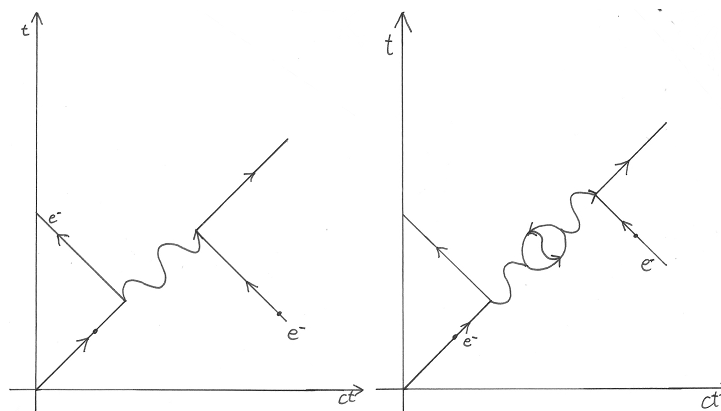



Abbildung 1.3: Die Elektron-Elektron Streuung

Doch das ist nicht die einzige Möglichkeit, wie dieser Prozess vonstatten gehen kann. Das Photon kann sich dazwischen beispielsweise auch in ein Elektron-Positron Paar aufspalten, das sich anschließend unter Aussendung eines Photons vernichtet. Die Besonderheit ist nun, dass man aufgrund der Quantenmechanik nicht sagen kann, welcher dieser Prozesse bei einer einzelnen Elektron-Elektron Streuung passiert. Viel mehr passieren alle Möglichkeiten

gleichzeitig. Die Wahrscheinlichkeit für diesen Prozess ist folglich auch die Summe der einzelnen Wahrscheinlichkeiten für jede Möglichkeit in der dieser Prozess ablaufen kann.
Alle Feynman-Diagramme sind aus einer eng begrenzten Anzahl an Vertices aufgebaut. Ein Photon kann beispielsweise nur auf zwei Arten mit einem Elektron wechselwirken.

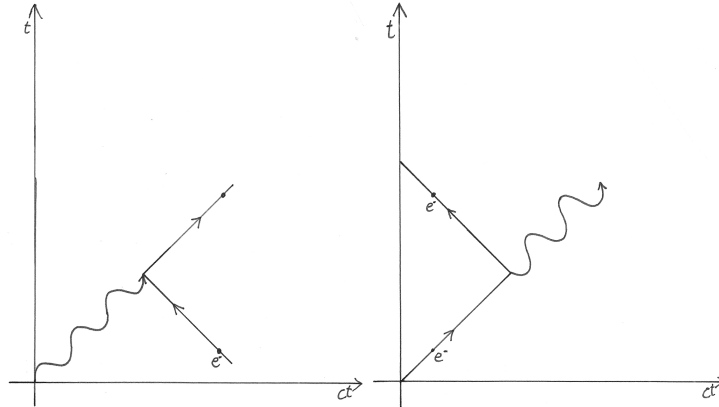



Abbildung 1.4: Ein Elektron emitiert ein Photon und erreicht einen Zustand niedrigerer Energie. Dreht man diesen Graphen um 180°, so erhält man den Absorptionsprozess.

Hier wird ein weiterer Vorteil der Feynman-Graphen deutlich: Dreht man den ersten Graphen direkt im Koordinatensystem um $180°$, was aufgrund der Zeitsymmetrie zulässig ist, so erhält man aus dem Emisionsprozess den Absorptionsprozess und umgekehrt. Die Wahrscheinlichkeit für einen Vertex wird mit der Kopplungskonstante der entsprechenden Wechselwirkung angegeben. Für den oben dargestellten beträgt diese etwa 1/137. Treten in einem Graph mehr als ein Vertex auf, so werden die Wahrscheinlichkeiten multipliziert. Wie man aus den Werten für $1/137 \approx 0,0073$ und $(1/137)^2 \approx 0,000053$ erkennt, steuern die komplizierteren Graphen im Falle der elektromagnetischen Wechselwirkung nur wenig zur Gesamtwahrscheinlichkeit der Reaktion bei.

# 2 Die vier Grundkräfte

Wie schon im zweiten Kapitel beschrieben, können alle Wechselwirkungen auf die Grundkräfte zurückgeführt werden. Sprich Phänomene, wie Adhäsion und Magnetismus sind nur Produkte aus umfassenderen Kräften (wie in diesem Fall aus der elektromagnetischen). Von diesen Kräften, die sich nicht in allumfassendere einordnen lassen, gibt es vier. Diese sind: Gravitation, elektromagnetische Wechselwirkung, starke Wechselwirkung und die schwache Wechselwirkung. Ladung ist hierbei immer die Ursache für die von diesen Wechselwirkungen hervorgerufenen Felder. Diese werden in diesem Kapitel genauer beschrieben:

## 2.1 Die Gravitation

Die Ladung der Gravitation ist die Masse. Sie ist die Grundkraft mit der ältesten mathematischen Beschreibung. Diese wurde 1686 von Isaac Newton formuliert, und deren Abweichungen sind bis heute nur mit sehr großem, technischem Aufwand nachweisbar.
Ihre Reichweite ist, wie schon zu Beginn erwähnt wurde, unendlich. In unserem Alltag spielt die Gravitation, abgesehen von der Schwerkraft und vielleicht noch den Gezeiten, nahezu keine Rolle. Das liegt am kleinen Wert der Gravitationskonstante $G \approx 6,6763 \cdot 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$. Um eine Vorstellung davon, wie klein diese Kraft in unserem Alltag ist, zu erhalten, soll hier die Kraft, die zwischen zwei 100 Tonnen schweren Körpern, die 1m voneinander entfernt sind, wirkt, berechnet werden. Wir verwenden das Newtonsche Gravitationsgesetz.

$$\begin{aligned}
&\vec{F} = G\frac{m_1 m_2}{r^2}\vec{r_0} \\
&m_1 = m_2 = 100t = 10^5 kg \\
&F \approx 6,6763 \cdot 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2} \cdot \frac{10^5 kg \cdot 10^5 kg}{1m} \\
&F \approx 0,66763 kg \cdot ms^{-2}
\end{aligned} \tag{2.1}$$

Das heißt, dass zwischen diesen Massen aufgrund ihrer Gravitation eine Kraft in der Größenordnung von 1N wirkt. Als Vergleich: Das Gewicht (also die Kraft, mit der ein Körper

in Richtung Erde gezogen wird) von 0,1kg beträgt etwa 1N. Ein weiteres Beispiel wäre die Gravitationskraft die zwischen Elektron und Proton im Atomkern wirkt.
Es wird mit $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} kg$ (Masse des Elektrons) und $m_p = 1,672 \cdot 10^{-27} kg$ (Masse des Protons) und $r = 5,291 \cdot 10^{-11} kg$ (Bohrscher Atomradius) gerechnet. Daraus ergibt sich für die Gravitationskraft:

$$F \approx 6,7 \cdot 10^{-11} \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,7 \cdot 10^{-27}}{(5,291 \cdot 10^{-11})^2} N \approx 3,7 \cdot 10^{-47} N \tag{2.2}$$

Im nächsten Kapitel wird diese Kraft in Relation zur elektromagnetischen gesetzt, sodass man sehen kann, dass die Gravitation auf dieser Ebene eine vernachlässigbare Rolle spielt. Auf kosmischer Ebene hingegen ist sie die einzige Kraft, die eine Rolle spielt. Das ist darauf zurückzuführen, dass es in Bezug auf die Gravitation nur eine Art von Ladung gibt und sich diese im Gegensatz zur elektromagnetischen Wechselwirkung nur verstärken kann.

## 2.2 Die elektromagnetische Wechselwirkung

Die Stärke dieser Wechselwirkung ist weitaus größer als die der Gravitation. Demtröder demonstriert dies sehr anschaulich an folgendem Beispiel:

> *"Wenn man von einer neutralen Kupferkugel mit einem Radius von 1,5cm nur 1% der* $1,2 \cdot 10^{24}$ *Atome einfach ionisieren und die Elektronen auf eine ansonsten gleiche, neutrale Kugel eine Überschussladung von* $\triangle Q = \pm 1,9 \cdot 10^3 C$*, und die beiden Kugeln würden sich mit einer Kraft von* $3,3 \cdot 10^{16} N$ *anziehen."*[1]

Das sind 16 Größenordnungen mehr als in dem bei der Gravitation gerechneten Beispiel und das obwohl es sich hier nur um 1% der Elektronen auf einer 1kg schweren Kugel handelt. Deshalb besitzen auch fast alle Körper aus unserem Alltag beinahe die selbe Anzahl an positiven und negativen Ladungsträgern, sodass wir sehr selten beobachten, dass sich zwei Körper aufgrund ihrer elektrischen Ladung gegenseitig anziehen oder abstoßen. Auf atomarer Ebene hingegen, spielt sie, beispielsweise zwischen Elektronen und Protonen, durchaus eine Rolle. Somit ist diese Wechselwirkung für den Zusammenhalt aller Atome und in weiterer Folge nahezu der gesamten, auf der Erde existierenden Materie verantwortlich. Hierzu wird das im vorherigen Kapitel angeführte Beispiel weitergeführt. Die Ladung des Elektrons und des Protons sind bis auf das Vorzeichen die gleichen (das Vorzeichen führt nur dazu, dass

[1] Demtröder: sexless, S. 4f

die Kraft anziehend und nicht abstoßend wirkt): $Q = 1,602 \cdot 10^{-19}C$.

$$F \approx \frac{1}{4\pi 8.9 \cdot 10^{-12}} \frac{1,6 \cdot 10^{-19^2}}{(5,3 \cdot 10^{-11})^2} \approx 8,1 \cdot 10^{-8}N \quad (2.3)$$

Dieser Wert mag extrem klein erscheinen, berechnet man jedoch das Verhältnis der gravitativen und der elektromagnetischen Kraft: $\frac{8,1 \cdot 10^{-8}}{3,7 \cdot 10^{-47}} \approx 2,2 \cdot 10^{39}$. So erkennt man, dass die elektromagnetische um 39 Größenordnungen stärker ist. Die theoretische Beschreibung ist, auch wenn sie nur eine sinnvolle Näherung sein soll, weitaus komplizierter, als die der Gravitation. Das liegt daran, dass die Effekte, die sich dadurch, dass die Kraft nicht direkt, sondern durch ihre Überträgerteilchen – die Eichbosonen, die sich nur mit Lichtgeschwindigkeit bewegen können – übertragen wird, viel stärker als bei der Gravitation sind.
Daraus folgt zum Beispiel der Effekt, dass beschleunigte Ladungen elektromagnetische Wellen aussenden und dadurch Energie verlieren. Diese Effekte gibt es zwar auch bei der Gravitation (man spricht von Gravitationswellen — eine theoretische Vorhersage Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie), dort sind diese hingegen so klein, dass sie sogar mit den modernsten Geräten nur indirekt über den Energieerhaltungssatz nachgewiesen werden konnten. So ist das Coulomb'sche Kraftgesetz nur für unbewegte (oder sich sehr langsam bewegende) Ladungen gültig.[2] Die klassisch vollständige Beschreibung lieferte Maxwell mit seinen Maxwell-Gleichungen. Eine nähere Behandlung dieser würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Auf Quantenebene wird sie mit Hilfe der Quantenelektrodynamik (kurz QED) beschrieben. Das heißt, dass sie mit Hilfe von Feynman-Graphen approximiert wird. Das funktioniert so gut, dass die QED bis heute die Theorie ist, deren theoretische Berechnungen am exaktesten mit den experimentellen Daten übereinstimmen.

## 2.3 Die starke Wechselwirkung

Die starke Wechselwirkung wirkt nur zwischen Quarks und allen Teilchen, die sich aus ihnen zusammensetzen. Die starke Kernkraft, die für den Zusammenhalt der Atomkerne verantwortlich ist, ist nur ein Nebenphänomen von dieser. Ähnlich wie die Adhäsion ein Nebenphänomen der elektromagnetischen Wechselwirkung ist. Sie wird — ganz im Gegensatz zu den anderen Wechselwirkungen — mit steigendem Abstand größer, was unserer täglichen Wahrnehmung widerspricht, deshalb gibt es keine freien Teilchen, die bezüglich der starken Wechselwirkung eine Ladung aufweisen. Das heißt, dass diese bei normalen Verhältnissen nur im Atomkern wirkt.

[2] Resag, Jörg: sexless, S. 212

Die Ladung der starken Wechselwirkung ist die Farbladung. Diese kann man sich ähnlich wie die Farben in der Farbenlehre vorstellen. Das heißt, dass es drei Grundfarben gibt, die den drei Ladungsarten entsprechen. So wie die Farben zusammen weiß ergeben, würde dies einem ladungsfreien Zustand entsprechen. Doch wie kann die Ladung mathematisch beschrieben werden? Während es bei der Gravitation und der elektromagnetischen Wechselwirkung nur eine beziehungsweise zwei Ladungsarten gibt, die mit den reellen Zahlen (im Fall der Gravitation benötigt man sogar nur den positiven Bereich) beschrieben werden können, muss hier auf die komplexen Zahlen zurückgegriffen werden.

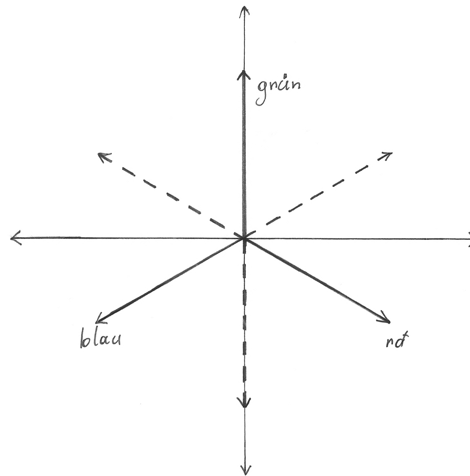



Abbildung 2.1: In der Abbildung ist zu sehen, dass die Vektoren für die drei verschiedenen Farben genau 120° zueinander verdreht liegen. Die gegenüberliegenden strichlierten Vektoren stehen für die Antifarben. Genau gesagt gibt es deshalb nicht drei, sondern sechs verschiedene Farben.

Die Besonderheit, die dazu führt, dass die Kraft mit wachsendem Abstand größer und nicht kleiner wird, ist, dass Gluonen selbst eine Farbladung besitzen. Daraus folgt, dass Gluonen miteinander wechselwirken können. Deshalb würden alle Gluonen, die zwischen freien Quarks als Überträgerteilchen fungieren würden, sich sofort gegenseitig anziehen, sodass ein Gluonenband entstehen würde.

Dieses verhält sich ähnlich wie ein Gummiband. Denn wie bei einem Gummiband, das im nicht gespannten Zustand keine Kräfte verursacht, verursacht die starke Wechselwirkung auf Quarks, die nahe beieinander sind, nahezu kein Kraft. Dieser Sachverhalt wird asymptotische Freiheit genannt. Das heißt, dass sich Quarks beispielsweise innerhalb eines Protons oder Neutrons nahezu kräftefrei bewegen können.

Der zweite Sachverhalt, der auf die starke Wechselwirkung ebenso wie auf ein Gummiband zutrifft, ist, dass die Kräfte, die diese verursachen, mit steigendem Abstand (oder steigender Ausdehnung des Bandes) größer werden. Dies führt dazu, dass, wenn man zwei Quarks,

aus denen ein Meson aufgebaut ist, genügend weit voneinander entfernt, die Energie, die aufgewendet werden musste, um diese so weit auseinander zu bringen, ausreicht, um ein Quark-Antiquark Paar zu erzeugen. Bei einem Gummiband kann das als Reißen interpretiert werden.

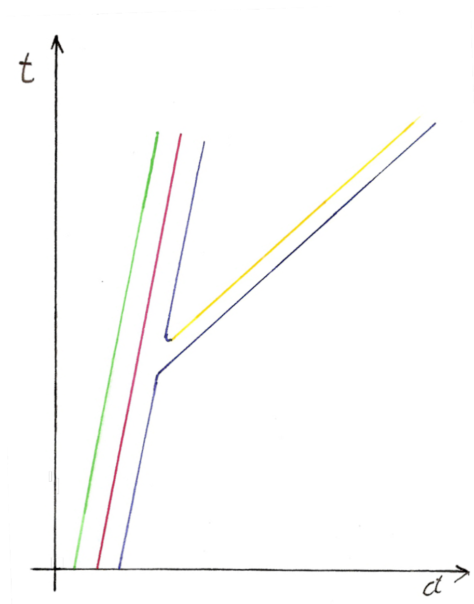



Abbildung 2.2: Der oben beschriebene Sachverhalt wird in dieser für ein aus drei Quarks bestehendes Hadron veranschaulicht. Ein Quark wird durch einen aus der Abbildung nicht zu erkennenden, äußeren Einfluss immer weiter von den restlichen Quarks gezogen, bis die potentielle Energie genügend groß ist, um zwei neue Quarks zu erzeugen. Das hierbei entstandene Meson kann, von der Starken Kraft unbeeinflusst, davonfliegen.

Aus diesem Grund gibt es auch keine freien Teilchen, die eine Ladung bezüglich der starken Wechselwirkung besitzen. Deshalb könnte man auch vermuten, dass sie eine begrenzte Reichweite hat, und die Gluonen eine Ruhemasse besitzen. Dies trifft nach dem derzeitigen Stand der Wissenschaft aber nicht zu. Eine Gegebenheit, die bei den vorher genannten still vorausgesetzt wurde, und die für die starke Wechselwirkung nicht zutrifft, ist das Superpositionsprinzip. Dieses besagt, dass, wenn mehr als zwei Ladungsträger vorhanden sind, das resultierende Feld additiv, ohne sich gegenseitig weiter zu beeinflussen, berechnet werden kann. Bei der starken Wechselwirkung hingegen müssen sich die Ladungen der Teilchen, damit diese von ihr gegenseitig angezogen werden, insgesamt aufheben. Aus der oberen Grafik erkennt man sofort, dass folglich nur Teilchen mit zwei oder drei Quarks entstehen können. Mit zwei ergibt sich die Möglichkeit, dass ein Quark-Antiquark-Paar zu einem Teilchen verschmilzt. Diese sind extrem kurzlebig, da sich die Quarks nach kurzer Zeit gegenseitig vernichten. Drei Quarks können beispielsweise zu einem Proton oder Neutron verschmel-

zen. Diese sind, wie uns bekannt ist, weitaus langlebiger. (Im Fall des Protons ist bis jetzt keine Halbwertszeit bekannt.)[3]
Eine Theorie für die mathematische Beschreibung der starken Wechselwirkung kann, selbst wenn sie nur eine gute Näherung sein soll, nicht klassisch sein. Eine andere Möglichkeit wäre, die Wechselwirkung über Feynman-Graphen zu beschreiben. Doch auch dies ist aufgrund der großen Kopplungkonstante nicht möglich. Das heißt, dass die Wahrscheinlichkeit der Feynman-Graphen nicht so wie bei der elektromagnetischen Wechselwirkung rasch gegen null strebt. Deshalb müsste eine viel größere Anzahl an Graphen addiert werden, um eine sinnvolle Näherung zu erhalten. Doch das bewältigen zur Zeit nicht einmal die stärksten Computer.

## 2.4 Schwache Wechselwirkung

Obwohl dies der Name suggeriert, ist die schwache nicht wirklich die schwächste der Fundamentalwechselwirkungen. Die Gravitation ist um einige Zehnerpotenzen schwächer. Doch während die Gravitation eine unendliche Reichweite besitzt, hat die schwache Wechselwirkung eine, die gerade einmal der des Durchmessers eines Wasserstoffkerns entspricht. Somit ist sie die Kraft, deren Auswirkungen am schwierigsten zu beobachten sind. Das heißt, dass sich diese Wechselwirkung nicht dadurch, dass sie Teilchen und Objekte aneinander zieht oder trennt, manifestiert, sondern meistens durch Reaktionen auf nuklearer Ebene. Die Überträgerteilchen der schwachen Wechselwirkung sind die $W^{\pm}$- und $Z^0$-Teilchen. Deren Masse kann aus der Reichweite der Wechselwirkung berechnet werden.

> "*Aus der Unschärferelation hatten wir nämlich geschlossen, dass man sich einen Energiebetrag $\Delta E$ für die Zeit $\Delta t \approx h/\Delta E$ vorübergehend borgen kann, ohne die Energieerhaltung zu verletzen. Multiplizieren wir diese Zeit $\Delta t$ mit der Geschwindigkeit v des Teilchens, so erhalten wir eine grobe Schätzung für die typische Entfernung R, die ein derartiges Teilchen zurücklegen kann, also:*
>
> $R = v \times (h/\Delta E)$ *Reichweite = Geschwindigkeit mal Zeit*"[4]

Diese Gleichung wird nun unter der Annahme, dass die Geschwindigkeit v bis auf vernachlässigbare Abweichungen der Lichtgeschwindigkeit c entspricht (um wirklich auf die maximale Reichweite zu kommen), umgeformt. So kann aus der Reichweite die Masse der Überträgerteilchen bestimmt werden. Man erhält eine Masse, die der 200-fachen Elektronenmas-

[3] Resag, Jörg, a. a. O., S. 106ff
[4] Hey, Tony; Walters, Patrick: sexless, S. 200f

se entspricht. Dies ist der wesentliche Unterschied zu den anderen Wechselwirkungen, die in der Regel durch Bosonen ohne Masse übertragen werden und deshalb eine unbegrenzte Reichweite besitzen.

### 2.4.1 Das W$^{\pm}$-Boson

Einige Elementarteilchen besitzen, bis auf ihre verschiedene Masse, exakt die gleichen Eigenschaften. Das heißt, dass sich das Elektron und das Myon nur hinsichtlich ihrer Masse unterscheiden. Davon ausgehend werden die Elementarteilchen in drei Gruppen eingeteilt:

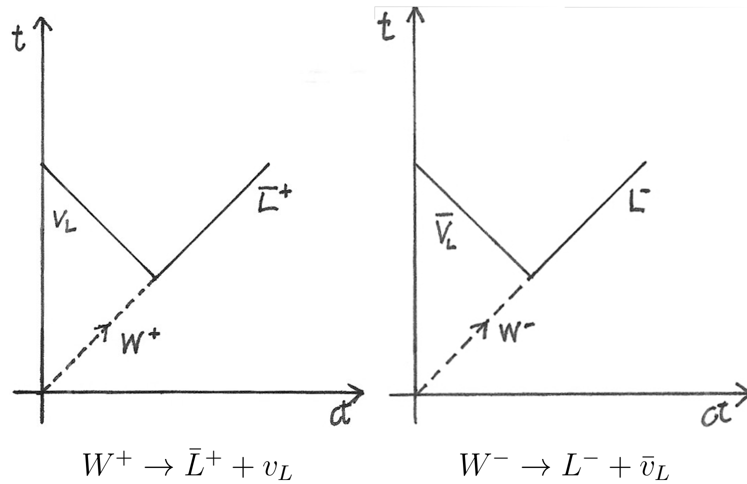
| 1. Generation | 2. Generation | 3. Generation | Ladung |
|---|---|---|---|
| u (up) | c (charme) | t (top) | +2/3 |
| d (down) | s (strange) | b (bottom) | -2/3 |
| $v_e$ (Elektron-Neutrino) | $v_\mu$ (Myon-Neutrino) | $v_\tau$ (Tau-Neutrino) | 0 |
| e (Elektron) | $\mu$ (Myon) | $\tau$ (Tau) | -1 |

Abbildung 2.3: In den Spalten sind von links nach rechts die Gruppen nach steigender Masse geordnet. Die Ladung wird in Einheiten der Elementarladung e angegeben.

Die anderen Wechselwirkungen machen keine Unterscheidung, wenn es um die Interaktion zweier Teilchen aus zwei verschiedenen Gruppen geht. So kann sich beispielsweise ein up- mit einem strange- und einem bottom-Quark zu einem Proton-ähnlichem Teilchen vereinigen. Doch alle Partikel, die sich teilweise oder ganz aus Teilchen der zweiten oder dritten Gruppe zusammensetzen, sind extrem instabil und haben eine Lebensdauer, die weit unter einer Sekunde liegt. Für diese Zerfälle ist einzig und allein die schwache Wechselwirkung, genauer die $W^{\pm}$Bosonen, verantwortlich. Das heißt, dass sich ein W$^{\pm}$-Boson Teilchen innerhalb der Zeilen ineinander umwandeln kann.

#### Kopplung der W$^{\pm}$-Bosonen an Leptonen

Die Feynman-Graphen, bei denen die $W^{\pm}$-Bosonen an andere Leptonen (das sind Elektronen und Neutrinos) aneinander koppeln, sind folgende:




$W^+ \rightarrow \bar{L}^+ + v_L$ $W^- \rightarrow L^- + \bar{v}_L$

Abbildung 2.4: Der $W^{\pm}$-Zerfall

L steht für ein beliebiges Lepton, das heißt e, $\mu$ und $\tau$, und $v_L$ für ihre zugehörigen Neutrinos. Die Leptonenzahl bleibt in diesen Reaktionen immer erhalten. Ein Elektron, Myon oder Tau und die zugehörigen Neutrinos besitzen die Leptonenzahl eins, die Antiteilchen hingegen minus eins. Das W$^{\pm}$-Boson die Leptonenzahl null, sodass aus einem W$^{\pm}$-Teilchen immer entweder ein Lepton und das zugehörige Antineutrino oder ein Antilepton und das zugehörige Neutrino entstehen. Wie schon bei den vorherigen Feynman-Graphen, kann man auch diese drehen und man erhält wiederum mögliche Reaktionen. Deshalb kann das Myon über ein $W^-$-Boson in zwei Neutrinos und ein Elektron zerfallen:

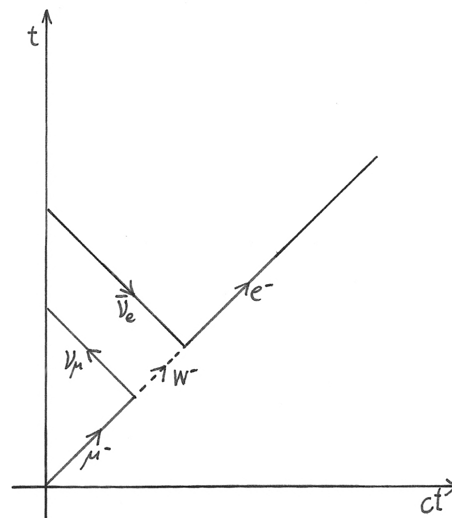
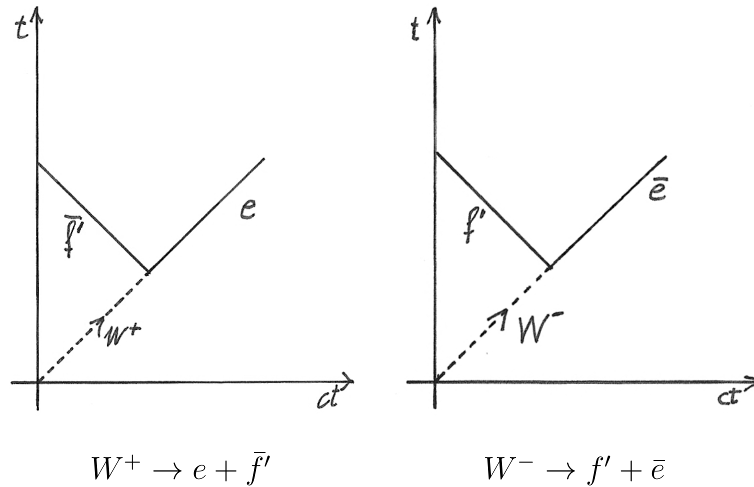



Abbildung 2.5: $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{v}_e + v_\mu$

Ähnlich verläuft der Zerfall des $\tau$-Leptons.

**Kopplung der W$^{\pm}$-Bosonen an Quarks**

Doch nicht nur die Leptonen der 2. und 3. Generation, auch die Partikel, die Quarks dieser Generationen enthalten, sind instabil und zerfallen nach extrem kurzer Zeit. Deshalb muss es auch für diese einen Zerfall über das $W^{\pm}$-Boson geben. Doch dieser gestaltet sich um einiges schwieriger als bei den Leptonen. Zur Erklärung wird ebenfalls mit den Feynman-Graphen begonnen.




$W^+ \rightarrow e + \bar{f}'$ $\qquad$ $W^- \rightarrow f' + \bar{e}$

Abbildung 2.6: Der $W^{\pm}$-Zerfall

Ähnlich wie bei den Leptonen entspricht hier das e einem Quark mit der Ladung +2e/3 (u, c oder t). f' hingegen entspricht nicht, wie zuerst zu vermuten ist, dem entsprechenden Quark mit der Ladung -1e/3 aus der entsprechenden Generation, sondern einer Linearkombination dieser Quarks aus allen 3 Generationen (d', s' und b'). Zur Beschreibung dieser Gegebenheit wird eine CKM-Matrix (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa) verwendet. Dabei werden die drei Teilchengenerationen als Vektor angeschrieben und anschließend mit ebendieser Matrix multipliziert.

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \tag{2.4}$$

Die einzelnen Werte der $V_{ij}$-Matrix geben das Verhältnis der Wahrschinlichkeit, dass W$^{\pm}$-Bosonen an die Quarks i und j koppeln, an.[5] Diese können teilweise experimentell bestimmt, teilweise berechnet werden. $V_{ud}$ beispielsweise erhält man aus den $\beta^{\pm}$-Zerfällen.[6] (Auf diese wird

[5] sexless

[6] Lohrmann, Erich: sexless, S. 212

später noch genauer eingegangen.) Damit kommt man auf:

$$|V| \approx \begin{pmatrix} 0,9743 & 0,2253 & 0,0035 \\ 0,2252 & 0,9734 & 0,0412 \\ 0,0087 & 0,0404 & 0,9991 \end{pmatrix}. \tag{2.5}$$

Wie daraus zu erkennen ist, bevorzugen die $W^{\pm}$-Bosonen Reaktionen innerhalb der Generationen. Das heißt, dass u am liebsten mit d, c mit s und b mit t an ein $W^{\pm}$ koppeln.
Weil die Teilchen der 3. Generation eine so extrem große Masse besitzen (das up-Quark hat eine Masse von 1,7MeV/$c^2$, das top $1,7 \cdot 10^5$MeV/$c^2$, das top ist also um 5 Größenordnungen schwerer) kann diese auch für eine gute Näherung vernachlässigt werden. Dann reduziert sich diese komplizierte Matrix auf[7]:

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} cos\theta_c & sin\theta_c \\ -sin\theta_c & cos\theta_c \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix} \tag{2.6}$$

Es Gilt $sin\theta_c = 0,223 \pm 0,002$. Dies kann aus $V_{us}$ berechnet werden. Daraus ergibt sich ein Winkel von rund $13°$ für $\theta_c$. Wie aus der Formel ersichtlich ist, hat d' einen d-Anteil von $\approx 0,97$, der sich aus $cos 13°$ ergibt. Der s-Anteil ist entsprechend klein und hat nur einen Wert von $\approx 0,22$ . Das heißt, dass das $W^-$-Boson den Prozess $W^- \rightarrow \bar{u} + d$ bevorzugt (in 97% der Fälle reagiert es so) und in nur ganz wenigen Fällen zu $\bar{u} + s$ reagiert. Ähnlich verhält es sich mit s'. Dieses hat ebenfalls einen sehr großen s-Anteil (ebenfalls $\approx 0,97$) und nur einen kleinen d-Anteil. Hier ist allerdings zu beachten, dass die 3. Generation aufgrund der größeren Masse des s-Quarks eine größere Rolle spielt. (Auch wenn diese trotzdem vernachlässigt werden kann.) Dass d', s' und b' als Linearkombination festgesetzt werden, ist reine Konvention. Man könnte dies natürlich auch umgekehrt festlegen.
Ganz allgemein ist auch noch zu beachten, dass diese Reaktionen immer nur auftreten, wenn sie energetisch zulässig sind. Das heißt, dass das $W^{\pm}$-Boson grundsätzlich genügend schwer ist, um in die besagten Teilchen zu zerfallen, und das nur möglich ist, wenn dieses genügend Energie in Form von kinetischer Energie innehat.

### Beispiele von Reaktionen bei denen ein W$^{\pm}$-Boson beteiligt ist

Als Beispiel wird hierzu der $\beta^{\pm}$-Zerfall näher betrachtet. Dieser tritt bei instabilen Atomkernen auf. Dabei zerfällt entweder ein Proton zu einem Neutron oder umgekehrt. Dieser Zerfall tritt bei instabilen Kernen auf, bei denen ein ungünstiges Verhältnis von p zu n vorliegt. Durch die Umwandlung eines Protons zu einem Neutron beziehungsweise von einem

[7]Lohrmann, Erich, a. a. O., S. 169ff

Neutron zu einem Proton erreicht der Kern einen energetisch günstigeren Zustand. Beim $\beta^-$-Zerfall sendet ein Neutron (zwei down-Quarks und ein up) ein Elektron und ein Neutrino aus und verwandelt sich deshalb in ein Proton (ein down und zwei up). Der $\beta^+$-Zerfall verläuft umgekehrt:

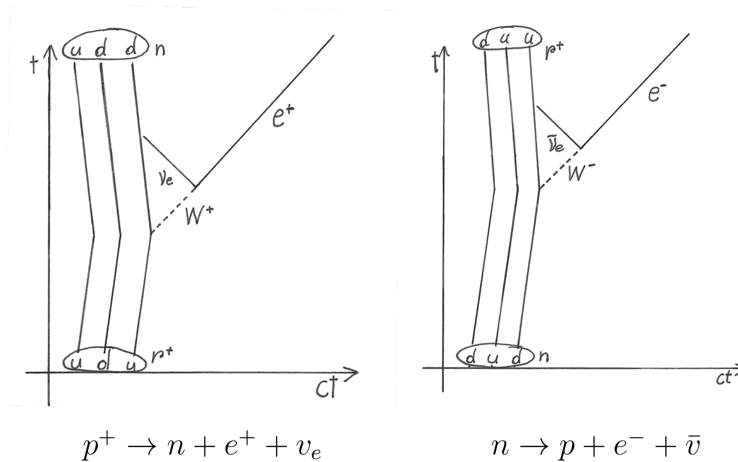



Abbildung 2.7: Die $\beta^{\pm}$-Zerfälle

Es mag zwar im ersten Moment danach aussehen, dass der $\beta^-$-Zerfall energetisch nicht zulässig ist, weil das Proton leichter als das Neutron ist, in das es zerfällt, und zusätzlich noch ein Positron und ein Neutrino entstehen. Jedoch vergisst man bei dieser Überlegung die potentielle Energie. Denn die Kerne, die diesen Zerfall durchlaufen, besitzen häufig viele Protonen. Deshalb ist es für sie energetisch günstiger, wenn sich ein Proton in ein schwereres Neutron, das sie dafür stärker an den Kern binden können, umwandelt.[8] Bei den $\beta^{\pm}$-Zerfällen ändert sich zwar das Element, jedoch nicht die Massenzahl. Für den $\beta^-$-Zerfall gilt ganz allgemein (A ist die Massenzahl und Z ist die Kernladungszahl. X und Y sind beliebige Elemente, die durch die Kernladungszahl Z bestimmt werden):

$$\begin{gathered} {}^{A}_{Z}X \to {}^{A}_{Z+1}Y + e^- + \bar{v}_e \\ \text{Für den } \beta^+\text{-Zerfall gilt:} \\ {}^{A}_{Z}X \to {}^{A}_{Z-1}Y + e^+ + v_e \end{gathered} \tag{2.7}$$

Wie ein Element zerfällt, kann man in einer sogenannten Isotopentabelle nachlesen:

[8] HEY, TONY; WALTERS, PATRICK, a. a. O., S. 142f

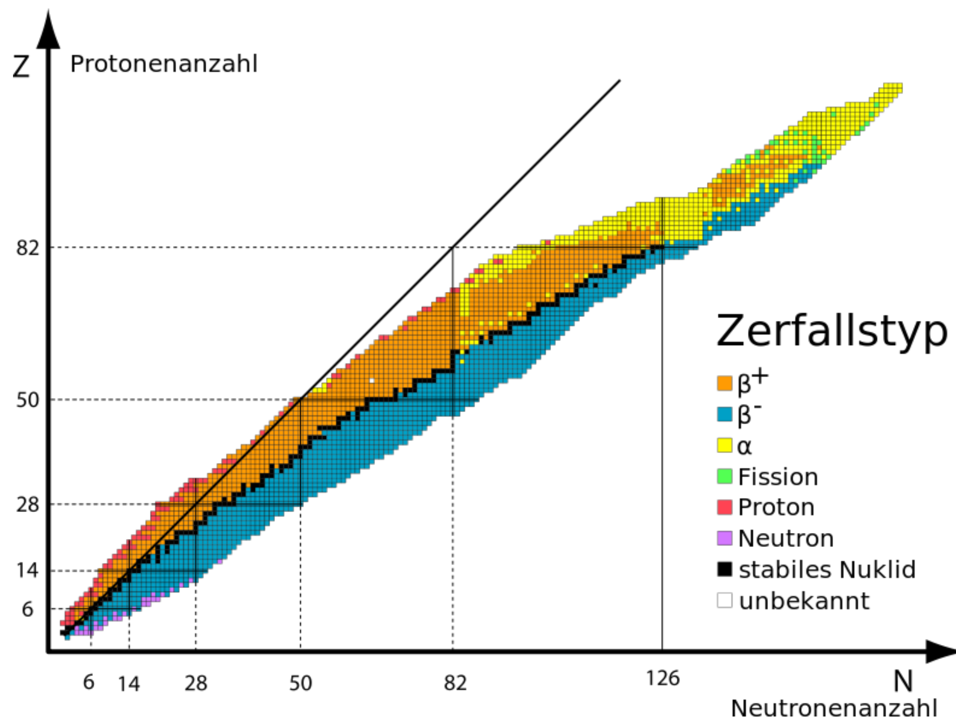



Abbildung 2.8: Die schwarzen, eher mittig liegenden, Isotope sind stabil (das heißt, dass sie nicht zerfallen). Darüber liegende (das heißt mit mehr Protonen) zerfallen meist durch einen $\beta^+$-Zerfall. Darunter liegende (das heißt mit mehr Neutronen) meist durch einen $\beta^-$-Zerfall.

Ein anderes Beispiel ist die Kernfusion in der Sonne. Hier ist der $\beta^+$-Zerfall von einem Proton zu einem Neutron maßgeblich für die Geschwindigkeit, mit der die Sonne Wasserstoffkerne (Protonen) zu Helium fusioniert. Diese Reaktion teilt sich in mehrere Einzelreaktionen, die mit der folgenden beginnen:



$$p^+ + p^+ \rightarrow^2_1 H + e^+ + v_e \tag{2.8}$$

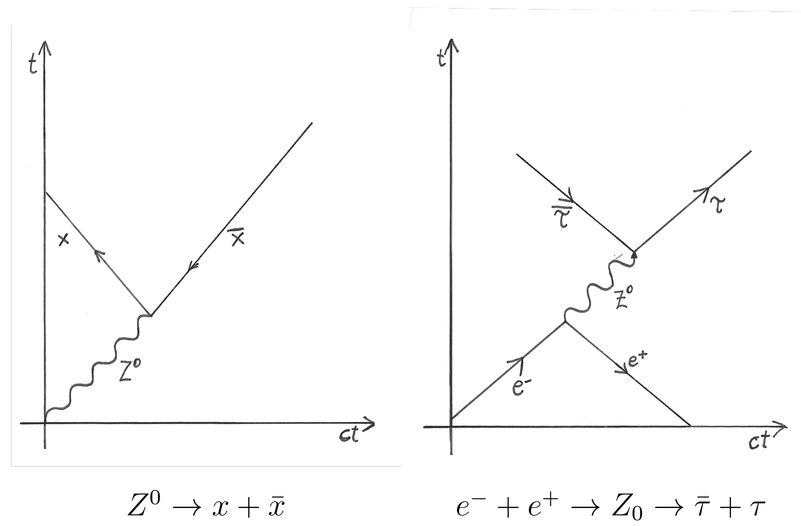
Trotz des extrem großen Druckes und Temperatur, die im Zentrum der Sonne herrschen, dauert es 14 Milliarden Jahre[9] bis ein beliebiges Proton diese Reaktion durchmacht. Dies erklärt auch die extrem lange Lebensdauer unserer Sonne, die es erst ermöglicht hat, dass sich so hochentwickeltes Leben auf der Erde entwickelt.

### 2.4.2 Das $Z^0$-Boson

Die $Z^0$-Bosonen besitzen im Gegensatz zu den $W^{\pm}$-Bosonen keine elektrische Ladung und sind etwas schwerer als diese ($91187 MeV/c^2$). Sie besitzen im Gegensatz zu diesen auch nicht

[9] Hey, Tony; Walters, Patrick, a. a. O., S. 143

die Fähigkeit, mit Teilchen aus verschiedenen Generationen oder Teilchen zu wechselwirken. Das heißt, es koppelt immer an ein Teilchen und dem entsprechenden Antiteilchen:




$Z^0 \rightarrow x + \bar{x}$ $\quad$ $e^- + e^+ \rightarrow Z_0 \rightarrow \bar{\tau} + \tau$

Abbildung 2.9: Reaktionen der $Z^0$-Bosonen

# 3 Der Higgs-Mechanismus

## 3.1 Die elektroschwache Wechselwirkung

Das $Z^0$-Boson verhält sich wie ein schweres Photon. Dies wird an der folgenden Reaktion gezeigt:

$$e^+ + e^- \rightarrow Z^0/\gamma \rightarrow q + \bar{q} \tag{3.1}$$




Abbildung 3.1: $q$ und $\bar{q}$ ist ein Quark-Antiquark-Paar. Bei dieser Reaktion kann das $Z^0$-Boson nicht vom Photon unterschieden werden. Die kinetische Energie des Elektrons und des Positrons muss entsprechend groß sein, damit sie sich wirklich in ein Quark-Antiquark Paar umwandeln können.

Bei derartigen Reaktionen ist es vorteilhaft, wenn die schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung im Zuge einer Theorie beschrieben werden, denn dies führt dazu, dass diese renormierbar bleibt. Das heißt, dass sich die möglichen Feynman-Graphen nicht zu unendlichen Ausdrücken entwickeln, sondern so miteinander interferieren, dass sie zumindest in einem bestimmten Energiebereich sinnvolle Werte ergeben.
Es kann auch die Kopplungsstärke der schwachen Wechselwirkung über den Weinbergwinkel $\theta_W$ berechnet werden. Dieser ist mit

$$\frac{m_W}{m_Z} = cos\theta_W \tag{3.2}$$

definiert ($m_W$ und $m_Z$ sind die Massen des $W^{\pm}$- beziehungsweise $Z^0$-Bosons)[1]. Mit $m_W \approx 80,4MeV/c^2$ und $m_Z \approx 91,2MeV/c^2$ ergibt sich $\theta_W \approx 28°$. Es gilt ebenfalls:

$$\alpha_W = \frac{\alpha_{em}}{sin^2\theta_W}. \tag{3.3}$$

$\alpha_W$ ist die Kopplungskonstante der schwachen Wechselwirkung, $\alpha_{em}$ die der elektromagnetischen. Mit $\alpha_{em} \approx 1/137$ ist $\alpha_W \approx 0,033$. Das heißt, die schwache Wechselwirkung ist sogar stärker als die elektromagnetische.

## 3.2 Ursache der Masse

Die Masse der W$^{\pm}$ und der Z$^0$-Bosonen stellt im Standardmodell ein ernsthaftes Problem dar. Denn die Wechselwirkungen werden allgemein im Zuge sogenannter Eichtheorien beschrieben. Diese führen nur zu sinnvollen Ausdrücken, wenn die Ruhemasse der Kraft übertragenden Teilchen gleich null ist. Deshalb führt man ein Feld ein, das sich im Viererimpulsquadrat wie die eine Masse verhält.
Der Viererimpuls ist eine Erhaltungsgröße in der speziellen Relativitätstheorie. Sie verbindet die Erhaltungsgrößen Masse und Energie der nicht relativistischen Theorien zu einer relativistischen Größe.[2]

$$E^2 = (pc)^2 + (m_0c^2)^2 \tag{3.4}$$

c ist die Lichtgeschwindigkeit, E ist die Gesamtenergie, p der Impuls und $m_0$ die Ruhemasse

Für Teilchen ohne Ruhemasse (das sind beispielsweise Photonen oder Gluonen) gilt $E^2 = (pc)^2$, während für in Ruhe liegende Massen $E^2 = (m_0c^2)^2$ gilt. Zieht man auf beiden Seiten die Wurzeln ergibt sich daraus die berühmte Formel $E = m_0c^2$.
Wie schon oben erwähnt, wird die Energie der Photonen und Gluonen durch den Term $E^2 = (pc)^2$ beschrieben. Nun gilt es einen Mechanismus zu finden, der in dieser Gleichung wie der Massenterm $m_0c^2$ wirkt. Dies wird durch die Einführung eines sogenannten Higgs-Feldes erreicht. Dieses ist ein skalares Feld und besitzt unter normalen Bedingungen (das heißt bis auf kurz nach dem Urknall oder unter speziellen Bedingungen in Beschleunigern) den Betrag H. Ein Teilchen besitzt nun die Ladung $g_H$ bezüglich dieses Feldes, sodass sich die Energie dieses Teilchens in Anwesenheit dieses Higgs-Feldes um $\Delta E = g_H H$ ändert. Im Gegensatz

[1] sexless
[2] Embacher, Franz, a. a. O., S. 207

zu den anderen besprochenen Feldern ändert sich beim Higgs-Feld nur die Energie und nicht die Richtung des Impulses eines Teilchens.[3] Eingesetzt in den Viererimpuls ergibt sich somit:

$$\begin{aligned} E^2 &= (pc)^2 + \Delta E^2 \\ E^2 &= (pc)^2 + g_H^2 H^2 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Das heißt, es gilt:

$$m_0 = \frac{g_H H}{c^2} \tag{3.6}$$

Auf diese Weise wird im Standardmodell nicht nur die Masse der $W^{\pm}$ und $Z^0$-Bosonen erzeugt, sondern die aller Teilchen, die eine Masse besitzen. Das heißt alle Teilchen, die eine Masse besitzen, besitzen eine Ladung $|g_H| \neq 0$ bezüglich dieses Feldes. Dies führt dazu, dass die Teilchen formal eine Masse erhalten.

Dies wird oft mit einer berühmten Person auf einer Party verglichen. Betritt diese einen Raum, so wird sich sofort eine Menschentraube um diese Person bilden, wodurch sich diese nur mehr schwer fortbewegen kann. Während eine eher unbekannte Person (diese gleichen den Photonen oder Gluonen) sich relativ unbeschwert durch den Raum bewegen kann. Die Menschenmenge kommt dem Higgs-Feld gleich, denn es verhindert, dass sich berühmte Menschen (der Ruhm steht für die Masse) unbehindert durch den Raum bewegen.

Das elektrische Feld jedoch besitzt im normalen Zustand die Feldstärke null. Dies ergibt sich, weil die Energie, die in dem Feld steckt, proportional zum Quadrat der Feldstärke ist (es gilt $E_{Energie} \propto |E_{Feldstärke}|^2$) und ein Feld immer den Zustand der minimalsten Energie anstrebt. Im Gegensatz zu anderen Feldern jedoch hat das Higgs-Feld nicht bei der Feldstärke null diesen Zustand, sondern einen von null verschiedenen. Dies kann folgendermaßen visualisiert werden:

[3] Ellwanger, Ulrich: sexless, S. 89ff




Abbildung 3.2: Links, die Feldstärke in Abhängigkeit von der Energie beim elektrischen Feld, rechts wie er beim Higgs-Feld ausschauen könnte.

Der tatsächliche Wert eines Feldes gleicht ebenfalls einem Ball in einer dermaßen geformten Schüssel. Das heißt, dass diese immer den Wert der niedrigsten Feldstärke anstrebt und nur durch Energiezufuhr einen höheren Wert annehmen kann.
Zum Abschluss dieses Kapitels sei noch erwähnt, dass dieser Mechanismus sehr den Photonen in Supraleitern gleicht. Supraleiter sind Metalle, die nahe dem absoluten Nullpunkt Strom verlustfrei leiten können. Das führt dazu, dass jedes magnetische Feld, welches um diese aufgebaut wird, durch einen entsprechend starken Elektronenstrom im Inneren des Metalls aufgehoben wird. Das heißt, die elektromagnetische Wechselwirkung besitzt in diesen Metallen eine extrem begrenzte Reichweite und damit besitzen die Photonen als Überträgerteilchen dieser Wechselwirkung, wie sich aus $\Delta t \approx \frac{h}{\Delta E}$ auch eine bestimmte Mindestenergie beziehungsweise Mindestmasse.

## 3.3 Probleme und Nachweis des Higgs-Teilchens – Mechanismus

Das Hauptproblem der Theorie ist, dass sie weder eine Berechnung der Masse der Elementarteilchen zulässt, noch erklärt sie, warum die Unterschiede zwischen den verschiedenen Teilchengenerationen so groß ausfallen wie sie auftreten. Das heißt, dass all diese Größen Parameter dieser Theorie sind und experimentell bestimmt werden müssen. Man kann auch nicht die Masse des Higgs-Bosons aus der der anderen Teilchen berechnen. Entsprechend schwierig ist auch die Verifizierung dieser Theorie. Das Einzige, das aus der Theorie für dieses Teilchen gilt, ist, dass es höchstens eine Masse von 200-300GeV besitzt und es die Eigenschaften eines typischen Bosons besitzt (Spin=0, keine eigene Ladung). Das heißt auch, dass es nach den Erhaltungssätzen (Ladungserhaltung, Leptonenzahl,...) wiederum nur in ein

Teilchen und das zugehörigen Antiteilchen oder mehrere Bosonen zerfallen kann.[4]

### 3.3.1 Nachweis des Higgs-Bosons am LHC

Der Beweis für die Existenz des Higgs-Mechanismus erfolgt über den Nachweis des Higgs-Teilchens in Beschleunigern. Dies stellte jedoch für eine relativ lange Zeit ein großes Problem dar, denn um ein Teilchen mit einer bestimmten Masse zu erzeugen, muss die Gesamtenergie der beiden Strahlen, die im Beschleuniger aufeinandertreffen, mindestens so groß wie die des zu erzeugenden Teilchens sein. Mit dem erst 2009 fertiggestellten LHC (kurz für Large Hadron Collider) kann nun endlich die benötigte Energie erreicht werden.
Der endgültige Nachweis ist weitaus schwieriger als sich vielleicht vermuten lässt. Denn im Gegensatz zu anderen Teilchen lässt sich das Higgs-Boson, weil es keine elektrische Ladung besitzt, nicht direkt über Spuren im Detektor nachweisen. Seine mittlere Lebensdauer beträgt etwa $10^{-22}s$, was die Suche weiter erschwert.[5]
Als einzige Nachweisart bleibt nur, dass simuliert wird, welche Teilchen mit und welche ohne Higgs-Boson auftreten würden. Die Simulation wird anschließend mit den realen Ergebnissen verglichen. Im Juni 2012 war es soweit, am LHC wurden genug Daten gesammelt, und es konnte das Higgs-Boson als letztes, vom Standardmodell vorhergesagtes Teilchen verifiziert werden. Dabei spielten drei sogenannte Zerfallskanäle, dies ist eine Art auf die ein Teilchen zerfällt, eine wesentliche Rolle. Wenn ein Higgs-Boson beispielsweise in zwei Gammaquanten zerfällt, so ist dies der $\gamma\gamma$-Kanal. Der Beitrag der jeweiligen drei Kanäle zur Bestätigung der Existenz des Higgs-Teilchens wird für das CMS-Experiment in der folgenden Grafik dargestellt (das CMS-Experiment (Compact Myon Solenoid) ist einer der zwei großen Detektoren am LHC):

[4] Lorenz, Robin: sexless
[5] sexless

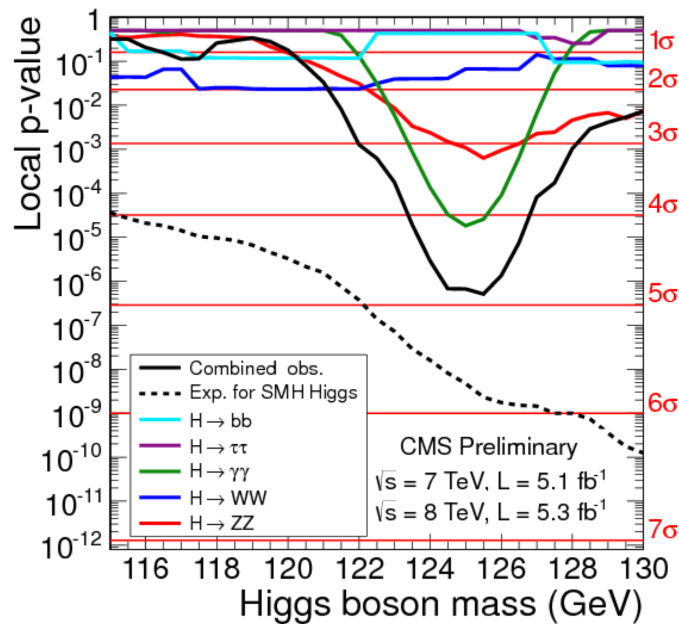



Abbildung 3.3: $\sqrt{s}$ gibt die Schwerpunktenergie der Proton-Proton-Kollisionen an. L gibt die integrierte Luminosität an. Das ist eine Einheit für die Zahl der gesamten Teilchenbegegnungen, die in dem Detektor stattgefunden haben.

$\sigma$ gibt die Wahrscheinlichkeit, dass die größere Häufigkeit des angegebenen Zerfalls nur ein statistischer Zufall ist und mit einer Theorie, die kein Higgs-Boson beinhaltet, erklärt werden kann, an. Wie aus der Grafik erkennbar ist, liegt dieser Wert zwischen 124 und 126 GeV über $5\sigma$. Dies ist auch die Grenze, ab der eine Entdeckung in der Teilchenphysik als gesichert gilt. Das heißt, dass die Wahrscheinlichkeit, dass es sich bei dem auftretenden Ergebnis um einen statistischen Zufall handelt bei 0,000057 % liegt. Andererseits bedeutet dies, dass mit einer Sicherheit von 99,999942 % das Higgs-Teilchen gefunden wurde, womit der Higgs-Mechanismus als bestätigt gilt. (Streng genommen ist nur ein Higgs-ähnliches Teilchen gefunden worden. Dass dieses nicht das gesuchte Boson ist, ist jedoch extrem unwahrscheinlich.)[6]

[6]CMS Experiment, CERN: sexless

# Literaturverzeichnis

(1) sexless*CKM-Matrix*. – Zugriff am 2013-01-05.

(2) sexless*Higgs - Boson*. – Zugriff am 2013-01-05.

(3) sexless*Weinbergwinkel*. – Zugriff am 2013-01-05.

(4) **CMS Experiment, CERN:** sexless*Beobachtung eines neuen Teilchens mit einer Masse von 125 GeV*. – Zugriff am 2013-01-30.

(5) **Demtröder:** sexless*Experimentalphysik 2, Elektrizität und Optik*. Springer, 2006.

(6) **Ellwanger, Ulrich:** sexless*Vom Universum zu den Elementarteilchen*. 2. Auflage. Springer-Verlag, 2011.

(7) **Embacher, Franz:** sexless*Elemente der Theoretischen Physik, Band 1: Klassische Mechanik und spezielle Relativitätstheorie*. Vieweg und Teubner Verlag, 2010.

(8) **Hey, Tony; Walters, Patrick:** sexless*Das Quantenuniversum, Die Welt der Wellen und Teilchen*. Spektrum, Akademischer Verlag, 1998.

(9) **Jaros, Albert; Nussbaumer, Alfred; Nussbaumer Peter:** sexless*Physik compact: Basiswissen 8*. ÖBV, 2007.

(10) **Lohrmann, Erich:** sexless*Hochenergiephysik*. 5. Auflage. B.G. Teubner Verlag, 2005.

(11) **Lorenz, Robin:** sexless*Higgs Produktion und Zerfall: Signaturen in pp und* $e^+e^-$ *-Kollisionen*. – Zugriff am 2013-01-05.

(12) **Resag, Jörg:** sexless*Die Entdeckung des Unteilbaren, Quanten, Quarks und der LHC*. Spektrum Akademischer Verlag, 2010.

# Abbildungsverzeichnis